

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ CoCrFeNiMn ПРИ ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Степанов Н.Д.

Руководитель - профессор, д.т.н. Салищев Г.А.

НИУ БелГУ, г. Белгород,

stepanov@bsu.edu.ru

Представлены результаты исследования эволюции микроструктуры высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn при прокатке при комнатной и криогенной температурах, а также при одноосной осадке при температурах 600-1100°C. Показано активное протекание деформационного двойникования в сплаве при прокатке на начальных степенях деформации и формирование полос сдвига на более поздних стадиях деформации. Установлено, что снижение температуры деформации ускоряет кинетику формирования микроструктуры. При осадке при температурах $\geq 700^\circ\text{C}$ наблюдается протекание динамической рекристаллизации; доля рекристаллизованного объема и размера рекристаллизованных зерен растет с увеличением температуры.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) – приблизительно эквиатомные многокомпонентные сплавы с числом компонентов не менее 5 – в последнее время вызывают заметный интерес у исследователей из-за привлекательных физико-механических свойств, присущих некоторым композициям [1]. При этом весьма дискуссионным остается вопрос об отличиях или сходствах ВЭСов с обычными, основанными на одном элементе, сплавами. Сложная многофазная структура, присущая большинству композиций ВЭСов, затрудняет получение ответа на данный вопрос. В этой связи большой интерес вызывают ВЭСы со структурой многокомпонентного неупорядоченного твердого раствора замещения, в частности, сплав CoCrFeNiMn, обладающий структурой твердого раствора на основе ГЦК решетки [2]. Так, для этого сплава были изучены закономерности диффузионных процессов [3] или статической рекристаллизации [4]. В данной работе представлены результаты исследований эволюции микроструктуры сплава CoCrFeNiMn в ходе (i) холодной листовой прокатки при комнатной и криогенной температурах со степенями деформации до 80%; (ii) одноосного сжатия до максимальной степени деформации 75% при температурах от 600°C до 1100°C.

Проведенные методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также EBSD анализа, исследования микроструктуры сплава CoCrFeNiMn после прокатки при комнатной и криогенной температурах показали, что в результате прокатки происходит сплющивание и вытягивание в направлении прокатки исходных зерен. Внутри зерен наблюдается

формирование наноразмерных двойников деформации, при этом с увеличением степени деформации увеличивается объемная доля зерен, охваченных двойникованием, и уменьшается расстояние между двойниками. Также в ходе пластической деформации происходит переориентация двойников в направлении течения материала. На конечных стадиях деформации происходит формирование полос сдвига толщиной несколько сот нанометров. Сравнение параметров микроструктуры образцов, деформированных при различных температурах, показало, что понижение температуры до криогенной заметно ускоряет кинетику формирования микроструктуры. Это отражается в повышении доли двойникованных зерен при заданной степени деформации и снижении степени деформации, при которой наблюдается возникновение полос сдвига, с 80% до 60%. Надо отметить, что интенсивное двойникование, наблюдаемое в сплаве CoCrFeNiMn при холодной пластической деформации хорошо соотносится с известными данными по энергии дефекта упаковки для данного сплава (~ 20 мДж/м²) [5], а характер эволюции микроструктуры не отличается от аналогичным материалов, например, аустенитных сталей с малой энергией дефекта упаковки (т.н. TWIP-сталей) [6].

Исследования микроструктуры сплава CoCrFeNiMn после осадки при температурах 600-1100°C, проведенные преимущественно с использованием метода EBSD анализа, показали, что формирующаяся в результате осадки структура заметно зависит от температуры деформации. После осадки при температуре 600°C в сплаве происходит формирование субструктуры внутри исходных, сплюснутых в ходе деформации, зерен и формирование полос сдвига. При повышении температуры деформации в сплаве формируются цепочки мелких рекристаллизованных зерен, при этом с увеличением температуры деформации увеличивается как рекристаллизованный объем, так и размер рекристаллизованных зерен. В теле исходных зерен по-прежнему наблюдается формирование субструктуры. После осадки при температурах 1000°C и 1100°C в сплаве формируется практически полностью рекристаллизованная структура с размером зерна соответственно 12.9 и 40.4 мкм. Исследования кинетики формирования микроструктуры при температуре 1000°C показали, что зависимость доли рекристаллизованного объема имеет сигмоидальный вид. Морфологические особенности структуры (извилистость границ исходных зерен, формирование характерных “ожерелий” по границам исходных зерен) позволяют заключить, что рекристаллизация в сплаве CoCrFeNiMn протекает по механизму прерывистой рекристаллизации, типичной для металлов с низкой или средней энергией дефекта упаковки [7].

Таким образом, исходя из результатов данной работы, можно заключить что процессы формирования микроструктуры в высокоэнтропийном сплаве CoCrFeNiMn с однофазной структурой на основе ГЦК неупорядоченного твердого раствора замещения, не имеют

принципиальных отличий от аналогичных процессов в “обычных”, т.е. основанных на одном компоненте, сплавов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

3. Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Prog. Mater. Sci.* Vol. 61 (2014) pp. 1–93.
4. F. Otto, A. Dlouhy, Ch. Somsen, H. Bei, G. Eggeler, E.P. George. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia* Vol.61 (2013) pp. 5743-5755.
5. K.-Y. Tsai, M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, Sluggish diffusion in Co–Cr–Fe–Mn–Ni high-entropy alloys, *Acta Mater.*, 61 (2013) 4887-4897.
6. F. Otto, N.L. Hanold, E.P. George. Microstructural evolution after thermomechanical processing in an equiatomic, single-phase CoCrFeNiMn high-entropy alloy with special focus on twin boundaries. *Intermetallics* Vol.54 (2014) pp. 39-48.
7. A.J. Zaddach, C. Niu, C.C. Koch, D.L. Irving. Mechanical Properties and Stacking Fault Energies of NiFeCrCoMn High-Entropy Alloy. *JOM*, Vol. 65 (2013) pp. 1780-1789.
8. P. Kusakin, A. Belyakov, R. Kaibyshev, D. Molodov, Microstructure evolution and strengthening mechanisms of Fe-23Mn-0.3C-1.5Al TWIP steel during cold rolling, *Mater. Sci. Eng. A* (2014) *in press*. DOI: 10.1016/j.msea.2014.08.05.
9. F.J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, second ed., Elsevier, Oxford, UK, 2004.